

УДК 550.834:622.12

## ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ

Азаров Н. Я., Глухов А. А.  
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

*У статті дано аналіз природи хвильових пакетів, утворюваних при збудженні коливань у вміщувальних породах; одержані аналітичні співвідношення для поля хвиль у вугільному пласті. Показано, що при проведенні прогнозних експериментів в умовах Донбасу збудження хвильових полів джерелом, розташованим у вміщувальних породах в безпосередній близькості від пласта, є не тільки можливим, але і доцільним. При цьому як інформативні хвильові пакети замість бічних хвиль виступають заломлені у вугільний пласт прямі хвилі.*

*In our paper we present analysis of the nature of wave trains generated when seismic waves are being excited in enclosing rocks. Analytical ratios of wave field in coal seam are obtained. It is shown that in predicted experiments in conditions of the Donets Coal Basin excitation of wave fields with an energy source located in enclosing rocks in close vicinity to the seam is not only practicable but also efficient. Direct waves refracted in coal seam serve as informative wave trains instead of out-of-plane waves.*

Современные методики прогноза опираются на возбуждение сейсмоакустических колебаний источником, размещаемым по центру угольного пласта. Это является идеальным условием для возбуждения каналовых волн, несущих основную информацию о его строении и об аномалиях. Однако в угленосных формациях Донбасса доминируют угольные пласты малой мощности, что

создает предпосылки для разработки методик, основанных на использовании волновых пакетов иной природы [1, 2]. В первую очередь это боковые волны сдвига и сжатия. Возникает важный вопрос: является ли центр пласта оптимальной точкой для генерации волн данной природы? Есть еще другая сторона данного вопроса. Конкретные условия проведения натуральных экспериментов не всегда позволяют возбуждать сейсмоакустические колебания путем удара тампером по обнажению пласта по причине его недоступности. При этом удары вынужденно производятся по породам почвы либо кровли. Опыт показывает, что в ряде случаев наблюдается устойчивый прием сейсмоакустических сигналов сейсмоприемниками с амплитудой, достаточной для последующего анализа [1].

Целью данной статьи является анализ природы волновых пакетов образуемых при возбуждении колебаний во вмещающих породах, а также выбор оптимальных условий расположения источника сейсмоакустических сигналов при проведении сейсмоакустических экспериментов на угольных пластах Донбасса.

Вынося источник во вмещающую породу, мы принципиально изменяем структуру волнового поля. Выражение потенциала  $\varphi$  для волны, которая проникнет в пласт-волновод, можно получить путем разложения исходной сферической волны на плоские с учетом того, что амплитуда каждой из них изменится при пересечении границы раздела пропорционально коэффициенту преломления, зависящему от угла падения  $\theta$ . Можно показать, что поле волны, преломленной в пласт можно представить в виде [3]:

$$\varphi = \varphi_{\text{прел}} + \varphi'_{\text{бок}},$$

где первое слагаемое – собственно преломленная волна ( $SS_1$  на рис. 1), выражение для которой имеет вид:

$$\varphi_{\text{прел}} = \frac{2}{r} e^{ik(r \sin \theta + Z_0 \cos \theta + D \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})} \left( \frac{\sqrt{r/Z_0} \cos^{3/2} \theta}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 + \sin^2 \theta}} + \frac{im}{n^2 - 1} \frac{1}{kr} \right), \quad (1)$$

а второе – волна ( $S'S_1$  на рис. 1), подобная боковой, имеющая место только в случае выполнения условия  $\sin \beta > 1/n$ . Её аналитическое выражение может быть записано в виде:

$$\varphi'_{бок} = \frac{2n}{R} e^{ik_1 R - kZ_0 \sqrt{n^2 \sin^2 \beta - 1}} \left( \frac{\cos \beta}{n \cos \beta + im \sqrt{n^2 \sin^2 \beta - 1}} + \frac{i}{m(1 - n^2)rk} \right). \quad (2)$$

В данных соотношениях  $k$  и  $k_1$  – волновые вектора волн, распространяющихся по направлениям  $SS_1$  и  $S'S_1$ , соответственно,  $n$  – показатель преломления;  $m$  – отношение плотностей породы и угля. Значение остальных коэффициентов и величин показано на рис. 1.

Амплитуда данной волны экспоненциально убывает при удалении источника колебаний от границы раздела [3]. Хотя приведенные выражения (1) и (2) строгие только для волн  $SH$  (выражение для полного поля гораздо более громоздко), они прекрасно иллюстрируют природу волн, попадающих в пласт.

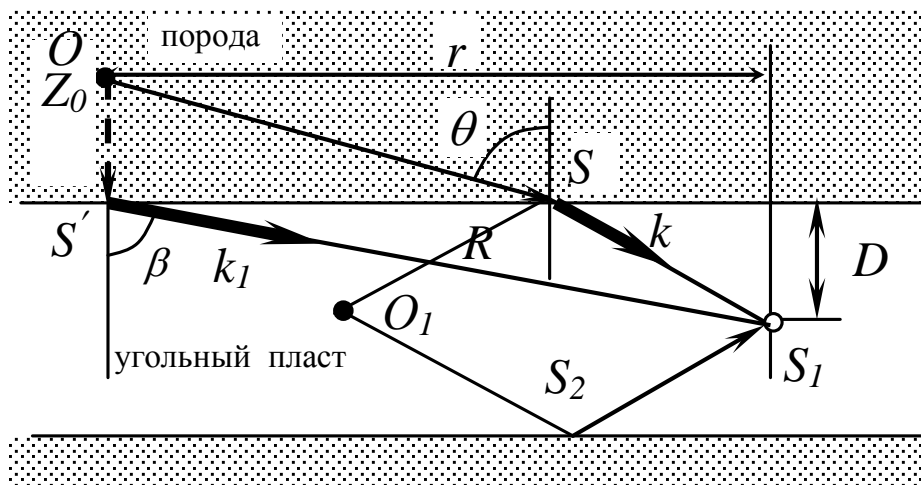


Рис. 1. К пояснению природы волн

В дальнейшем обе эти волны, могут в результате многократных отражений, число которых зависит от границ пласта, создать в результате интерференции волновое поле сложной структуры. Для случая непоглощающей среды очевидно, что волны, идущие от реального источника  $O$ , описываемые выражением (1), аналогичны с точностью до коэффициентов волнам, образованным мнимым источником  $O_1$  внутри слоя при однократ-

ном отражении от границы с верхней породой. Поле  $\varphi_k$ , образованное источником в точке  $O_1$  можно записать в виде:

$$\varphi_k = \varphi_{\text{прям}} + \varphi_B + \varphi_H. \quad (3)$$

В выражении (3)  $\varphi_{\text{прям}}$  – прямая волна,  $\varphi_B$  – вся совокупность волн, лучи которых на своём пути имеют участок от мнимого источника до верхней границы пласта,  $\varphi_H$  – вся совокупность волн, лучи которых на своём пути имеют участок от мнимого источника до нижней границы пласта. Выражение для поля, образованного источником в точке  $O$  с точностью до коэффициента идентично выражению для  $\varphi_B$ .

Точное выражение поля источника  $O$  можно получить следующим образом. Рассмотрим ход лучей, изображенный на рис. 2.

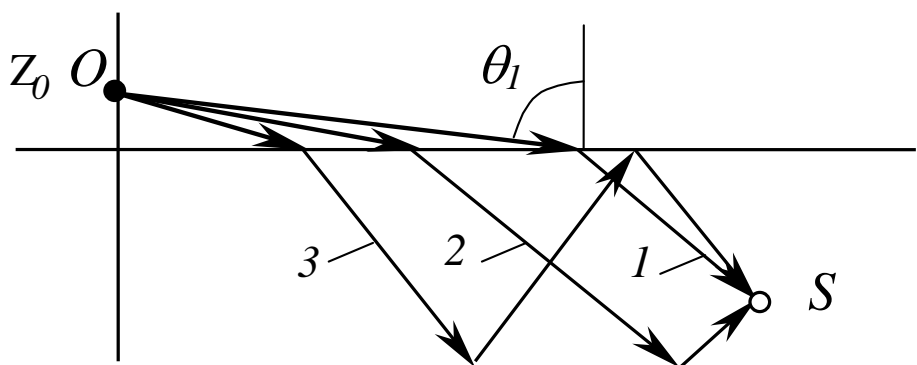


Рис. 2. К расчету поля волн в пласте при выносе источника колебаний за его пределы

При выводе соотношений воспользуемся методом, предложенным в [3] для решения задачи о поле вне слоя, возбужденном источником внутри такового. Как известно, сферическая волна, распространяющаяся от источника  $O$ , может быть разложена на систему плоских волн. Каждая из них в точку  $S$  внутри пласта может попасть бесконечным числом путей. Для примера некоторые из них изображены на рис. 2. Предполагаем, что волна образуется в источнике с единичной амплитудой и нулевой фазой и, падая на границу раздела сред ( $z = 0$ ), проходя по пути  $1$  к точке  $S$ , создает поле:

$$\phi_1 = We^{-ik_{1z}Z_0} \times e^{i(k_x X + k_y Y + k_z Z)},$$

где  $k_1$  – волновое число в породе,  $k$  – волновое число в угле,  $k_i$  – его компоненты,  $k_{1z} = \sqrt{k_1^2 - k_x^2 - k_y^2}$ ,  $W$  – коэффициент прозрачности границы раздела сред. При этом волновые числа связаны законом Снеллиуса:  $k \sin \theta = k_1 \sin \theta_1$ , где  $\theta_1$  – угол падения волны в породе,  $\theta$  – угол её преломления в пласт. Поле волны, приходящей в  $S$  по пути 2 имеет вид:

$$\phi_2 = We^{-ik_{1z}Z_0} \times e^{i(k_x X + k_y Y + k_z (2P-Z))} V_H,$$

где  $V_H$  – коэффициент отражения на нижней границе пласта. Поле волны, приходящей в  $S$  по пути 3 имеет вид:

$$\phi_3 = We^{-ik_{1z}Z_0} \times e^{i(k_x X + k_y Y + k_z (2P+Z))} V_H V_B,$$

где  $V_B$  – коэффициент отражения на верхней границе пласта. Таким же образом можно записать выражения для любых вариантов. Тогда, суммируя волны всех кратностей отражений, получим:

$$\phi = \sum_{m=1}^{\infty} \phi_{m1} = We^{-ik_{1z}Z_0} \times e^{i(k_x X + k_y Y)} \left( e^{ik_z Z} + V_H e^{ik_z (2H-Z)} \right) \sum_{m=0}^{\infty} (V_B V_H)^m e^{2ik_z m H}. \quad (4)$$

Учитывая, что сумма в конце выражения (4) представляет собой сумму членов геометрической прогрессии, его можно записать в виде:

$$\phi = We^{-ik_{1z}Z_0} \times e^{i(k_x X + k_y Y)} \frac{\left( e^{ik_z Z} + V_H e^{ik_z (2H-Z)} \right)}{1 - V_H V_B e^{2ik_z H}}. \quad (5)$$

Искомое поле источника  $O$  можно получить из (5) путем интегрирования по всем направляющим косинусам угла  $\theta_1$ :

$$\phi_o = \int_{\Gamma_1} We^{-ik_{1z}Z_0} \frac{\left( e^{ik_z (Z-H)} + V_H e^{ik_z (H-Z)} \right)}{e^{-ik_z H} \left( 1 - V_H V_B e^{2ik_z H} \right)} H_o^{(1)}(k_1 r \sin \theta_1) \sin \theta_1 d\theta_1, \quad (6)$$

где  $H_o^{(1)}$  – функция Ханкеля первого рода. Метод приведения интеграла к данному виду и особенности пути  $\Gamma_1$  (см. рис. 3) описаны в [3] достаточно подробно.

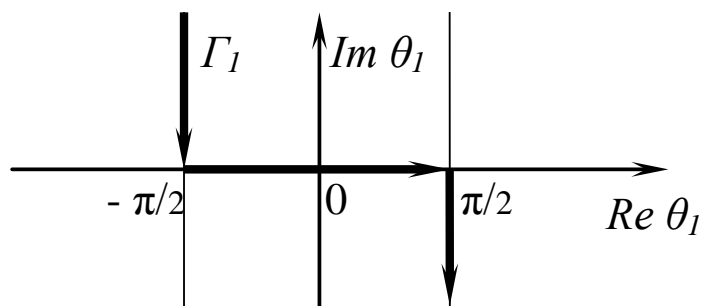


Рис. 3. Путь интегрирования в выражении (6)

С уверенностью можно говорить о том, что поле, порождаемое сферической волной, распространяющейся от реального источника  $O$ , является частью поля каналовых волн и, следовательно, может частично обладать их свойствами. Действительно, согласно [3] сумму волн всех кратностей, образованную источником внутри слоя (при  $Z > Z_0$ ), можно представить в виде выражения

$$\varphi_{\kappa} = e^{i(k_x X + k_y Y)} \left( e^{ik_z(Z-Z_0)} + V_B e^{ik_z(Z_0+Z)} + V_H e^{ik_z(2H-Z)} + V_H V_B e^{ik_z(2H-Z+Z_0)} \right) \sum_{m=0}^{\infty} (V_B V_H)^m e^{2ik_z m H}, \quad (7)$$

структура которого отличается от структуры выражения (4) только наличием двух дополнительных слагаемых в выражении в скобках и отсутствием коэффициента прозрачности границы раздела сред. Легко показать, что два дополнительных слагаемых в выражении (7) описывают поле  $\varphi_H$  – всю совокупность волн, лучи которых на своём пути имеют участок от мнимого источника до нижней границы пласта (при  $Z > Z_0$ ).

Вклады  $\varphi_B$  и  $\varphi_H$  в общее поле равнозначны с точностью до коэффициентов. Легко убедиться из очевидных соображений, что они имеют те же законы убывания, что и каналовая волна, а скорости их распространения аналогичны скорости распространения последней.

На основании вышеприведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– волна, которая проникает в пласт-волновод от источника вне пласта, образует в нем поле  $\varphi_O$ , подобное по своей структуре и свойствам полю каналовых волн и описываемое выражением (6);

– для задач прогноза горно-геологических условий залегания угольных пластов могут быть использованы источники, расположенные вне их пределов, а анализ поля  $\varphi_0$  может быть использован в современных прогнозных методиках.

По очевидной причине, второй из выводов верен на расстояниях, сравнимых с длиной волны, когда  $We^{-ik_1zZ_0}$  мало.

Итак, волна, возбуждаемая вне пласта, порождает в нем волну, подобную каналовой волне. Кроме этого, интересен вопрос о других типах возбуждаемых волн, тем более что наблюдение каналовых волн в типичном диапазоне шахтных сейсмических исследований крайне затруднено.

Для наглядности на рис. 4 показаны рассчитанные картины распространения колебаний, возбужденных источником по центру пласта и в кровле на расстоянии 1 м от его границы. Плоскость моделирования перпендикулярна плоскости напластования. Характер распределения амплитуд колебаний существенно отличается. Если источник располагается вне пласта, то наиболее скоростная группа колебаний имеет доминирующую амплитуду и состоит из боковых  $P$  волн, то при выносе его во вмещающие породы основу пакета образует преломленная в пласт прямая волна сжатия. Часть колебаний отражается от границ пласта в кровлю. На рис. 4 хорошо заметна полученная в результате отражения и трансформации волна сдвига, распространяющаяся прямолинейным фронтом. Часть колебаний преломляется в почву, образуя там сферический фронт волн сжатия и прямолинейный фронт волн сдвига.

Прямая  $P$  волна преломляется в пласт прямолинейным фронтом. Там она образует совокупность многократно отраженных волн (поле  $\varphi_0$  которых описывается выражением (6)). Они, в свою очередь, при приходе на границу раздела сред под углом большим либо равным углу полного внутреннего отражения будут источниками боковых волн. В данной ситуации боковые волны можно условно назвать вторичными. В [1] о таких волнах говорится как о кратных боковых волнах.

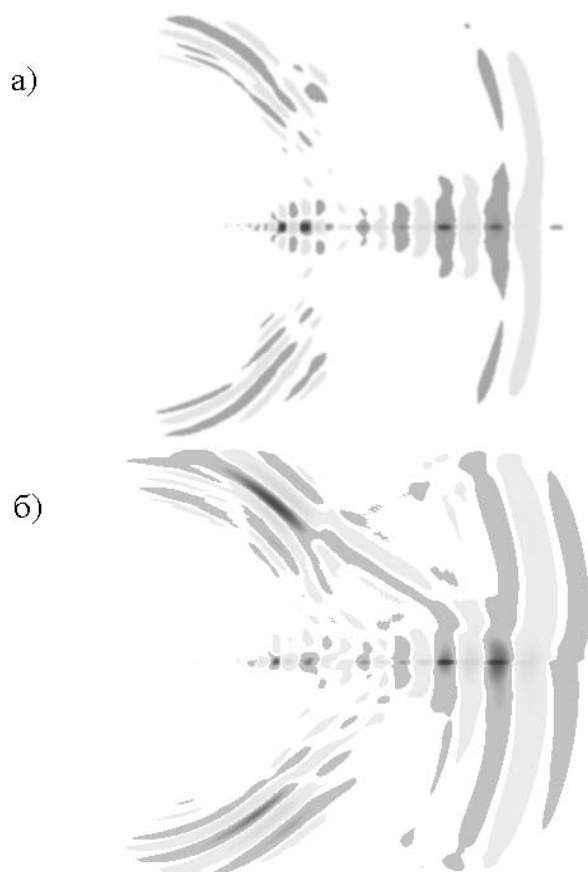


Рис. 4. Рассчитанные картины распространения колебаний, возбужденных источником по центру пласта (а) и в кровле на расстоянии 1 м от его границы

В реальности характерная частота продольной волны, как правило, не превышает 150–200 Гц [1, 2]. Длины волн многократно превышают мощность пласта. Фронты преломленной в пласт волны, отраженных и боковых волн малой кратности могут иметь разность хода много меньшую, чем длина волны. Они будут зарегистрированы сейсмоприемниками как единый волновой пакет, разделить составные части которого не представляется возможным.

Таким образом, в типичных горно-геологических условиях залегания угольных пластов Донбасса при возбуждении колебаний источником вне пласта в дальней зоне следует ожидать регистрации колебаний, основной вклад в которые вносят преломленные в пласт прямые волны. На рис. 5 обобщены результаты моделирования для сейсмогеологических разрезов, соответствующих волноводам простого строения. Варьировалась стадия мета-



морфизма угля и расстояние от источника колебаний до центра пласта.

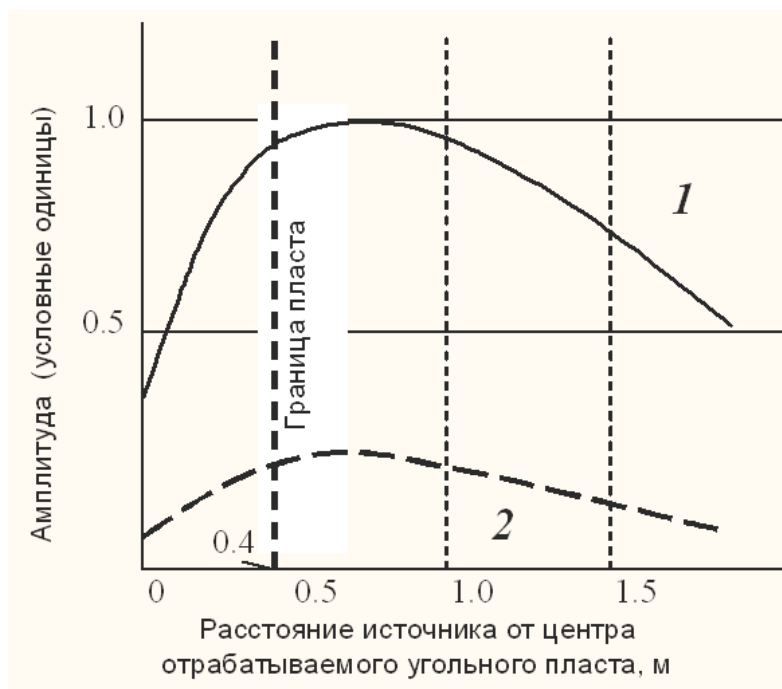


Рис. 5. Залежність амплітуди хвильових пакетів від розположення джерела сейсмічних коливань

Как и характерно, для угольных пластов малой мощности, на теоретических сейсмограммах проявляются два волновых пакета. При вынесении источника колебаний за границы пласта их амплитуда увеличивается, затем постепенно уменьшается. С одной стороны, удаление источника от границ пласта увеличивает расстояние пробега, с другой – уменьшает угол между направлением распространения волны и нормалью к плоскости напластования. Первое уменьшает амплитуду попадающей в пласт волны, а второе – увеличивает. Расчеты показывают, что оптимальная для возбуждения колебаний область располагается от границы пласта на расстоянии 0,5 – 1,0 м. Объяснить эту зависимость, оперируя только «классическими» боковыми волнами, не представляется возможным.

Данную особенность можно объяснить существенным вкладом в волновое поле преломленной в угольный пласт прямой волны. Легко показать, что вклад преломленной прямой волны

будет больше вклада любой иной волны, поскольку последние не только проходят большие расстояния, но и испытывают на своем пути дополнительные отражения и преломления. Кроме этого, амплитуда боковых волн в дальней зоне убывает с расстоянием по закону  $1/r^2$ , в то время как амплитуда прямой волны убывает по закону  $1/r$  [1, 3].

Таким образом, при проведении прогнозных экспериментов в условиях Донбасса возбуждение волновых полей источником, расположенным во вмещающих породах в непосредственной близости от пласта является не только возможным, но и целесообразным. При этом в качестве информативных волновых пакетов вместо «классических» боковых волн выступают преломленные в угольный пласт прямые волны.

### **СПИСОК ССЫЛОК**

1. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: ООО “Алан”, 2002. – 312 с.
2. Анциферов А.В., Глухов А.А., Сейсмические волновые поля, регистрируемые на угольных пластах Донбасса при решении задач шахтной сейсморазведки // Зб. научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ.– 2005. – № 23. – С. 120 – 128.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – 2-е изд. – М.: Наука, 1973. – 343 с.